DOI:
张春晖 张震.三相宽频智能电表开发研究［J］. ****，****，**，（**）：00-00
ZHANG Chunhui　ZHANG Zhen.Research on the development of three-phase broadband smart meters［J］. ****，****，**，（**）：00-00

三相宽频智能电表开发研究

张春晖[1]　张震[2]
(1.国网山东省电力公司，山东 济南　250001;2.华能济南黄台发电有限公司，山东 济南 250100)

摘　要：2021 年以来，电表行业面临市场增长缓慢、技术需求减少、人才流失和营收不足等多重挑战，电表行业当前面临的不景气情况，尤其是在新产品技术需求不足、开发人才流失以及营业收入无法适应企业发展需求等方面。针对这些问题，文章提出了推进国产智能电表计量新技术开发和应用的重要性，特别是指出需要适应新能源并网和复杂电网负荷引发的电能计量监测需求。为此，文章提出了经受实际电网波形测试考核的三相宽频智能电表开发应用新项目，以期推动电表行业新技术与市场的发展。同时，文章还提到了 0.005 级三相宽频电能标准表被列入国家重点研发计划，为三相宽频电能表的开发应用提供了计量溯源保证。此外，文章还分析了新能源并网对传统电网运行状态的影响，包括宽频振荡、过电压和宽频谐波电流等问题，并指出目前缺乏针对这些异常情况的在线计量监测智能电表。因此，开发三相宽频电能表对于解决这些问题具有重要意义。

关键词：三相宽频智能电表　宽频电能贸易结算电价 冲击负荷
中图分类号：TM933.4　**文献标识码：**　**文章编号：**

Research on the development of three-phase broadband smart meters

ZHANG Chunhui[1]　ZHANG Zhen[2]
(1.State Grid Shandong Electric Power Company,Jinan，Shandong 250001，China;2.Huaneng Jinan Huangtai Power Generation Co.，Ltd.，Jinan，shandong 250100，China）

Abstract: Since 2021, the meter industry has faced multiple challenges such as slow market growth, reduced technology demand, brain drain and insufficient revenue, and the current recession faced by the meter industry, especially in the lack of technical demand for new products, the loss of development talents, and the inability of operating income to meet the development needs of enterprises. In view of these problems, this paper puts forward the importance of promoting the development and application of new technologies for domestic smart meter metering, especially the need to adapt to the demand for electric energy metering and monitoring caused by the connection of new energy grids and complex power grid loads. To this end, this paper proposes a new project for the development and application of three-phase broadband smart meters that have undergone the actual power grid waveform test and assessment, in order to promote the development of new technologies and markets in the meter industry. At the same time, the article also mentions that the 0.005 three-phase broadband electric energy standard meter is included in the national key research and development plan, which provides a measurement traceability guarantee for the development and application of three-phase broadband electric energy meter. In addition, the paper also analyzes the impact of renewable energy integration on the operation status of traditional power grids, including broadband oscillation, overvoltage and broadband harmonic current, and points out the lack of online metering and monitoring smart meters for these anomalies. Therefore, the development of three-phase broadband watt-hour meters is of great significance to solve these problems.

收稿日期：　**修回日期：**
基金项目：
作者简介：张春晖 男 (1938-) 从事电能计量技术研究
通信作者：张震 男 (1977-)　从事电能计量技术研究　721047546@qq.com

Key words: Three-phase broadband smart meters Broadband electric energy trade settlement electricity price Shock loads

0 引言

2021年以来，电表行业情况不景气，主要反映在电表市场增量不大，新产品技术无需求，电表开发人才流失，电表年营业收入不能适应电表企业的发展。由此，继国网智能电表（2020版）之后，如何推进国产智能电表计量新技术开发、应用，加快拓展电表市场，成为电表行业新的期望。

综合来看，目前在国家继续执行正弦波电能电价政策的情况下，电表新产品开发、应用的出路，要适应国网、南网新型电力系统建设：新能源并网叠加谐波源用户负荷引发电网双向时变复杂波形负荷电流的电能计量监测需求。为此，本文作者汇总研究近两年智能电表动态计量技术走向，提出：经受实际电网波形测试考核的三相宽频智能电表开发应用新项目，期望依此推进电表行业新技术与市场的发展。

注：经受实际电网波形测试考核的三相宽频智能电表，以下简称“三相宽频电能表”。

1、据网上信息：0.005级三相宽频电能标准表首次被列入2022年国家重点研发计划“国际等效高精度计量仪器和标准器研制（一期）”项目，为三相宽频电能表开发应用提供计量溯源保证。

该“国际等效高精度计量仪器和标准器研制(一期)”项目，由国家最高计量行政部门组织编制、整体申报，并由科技部组织实施。

1）0.005级三相宽频电能标准表是区域级（计量研究院）溯源量传主标准器，保障电能贸易结算公平公正。其频率45Hz~1kHz，电压30～500V，电流10mA～120A，功率/电能标准不确定度1.0·10^-4～2.5·10^-5。

2）2023年2月27日，该“国际等效高精度计量仪器和标准器研制（一期）”项目启动会暨实施方案论证会在长沙市召开。

0.005级三相宽频电能标准表项目，由湖南省计量测试研究院牵头承担，中国计量院、中国电科院、北京东方计量测试研究所、天恒测控等10家单位联合研究 。项目执行期原则上为3-4年。

3）本文点评

目前，国家尚未出台宽频电能贸易结算电价新政。

这次，国家最高计量行政部门将0.005级三相宽频电能标准表列入“国际等效高精度计量仪器和标准器研制（一期）”项目，明确用以保障电能贸易结算公平公正，說明未来国家出台宽频电能电价政策已成为国家相关部门的共识，对推进三相宽频电能表开发应用具有重要意义。首先，三相宽频电能表计量溯源有了依据；同时，三相宽频电能表开发应用对电力部门进行新能源并网引发高压电网宽频振荡、过电压，叠加谐波源用户负荷引起宽频谐波污染的在线计量监测提供技术支撑，也为国网、南网向国家申报：出台宽频电能贸易结算电价新政，提供可信计量数据。

2、新能源并网颠覆了传统电网运行状态，各电压等级电网反映的电网运行异常问题不同。对这些电网运行异常情况，目前还缺乏在线计量监测的智能电表。

1）新能源经特高压工程送出，电网存在宽频振荡和暂态过电压等安全稳定问题。

2021年4月，中国电科院《大規模新能源基地并网特性分析与控制》指出：

— 2015-2017年，新疆哈密风电基地频繁发生次/超同步振荡。振荡频率范围：3Hz～100Hz～1000Hz。引起宽频振荡的原因：高压新能源通过电力电子装置并网。并网特性涉及电力调度控制环节的转速控制、锁相环、电流环、LC滤波等诸多电力电子设备。

— 青豫直流交流特高高工程N-1短路故障导致送端光伏严重过电压，接近额定电压的1.5倍，持续时间小于/等于15ms。

2）高压谐波源用户负荷引起宽频谐波污染：高压谐波源用户主要有电气化轨道交通、可控硅整流、电弧炉、轧钢机、电力机车等。这些用电负荷的宽频谐波计量监测情况（待查询）。

3）中压/低压电网的分布式新能源负荷电流具有双向、时变、非稳态的特征，叠加中压/低压谐波源用户负荷引起宽频谐波污染。

2022年10月25日，中国电科院《新型电力系统动态电能计量关键技术》（以下简称“文A”)說明：

— 新型电力系统典型规模综合能源配电网中，中压公共节点电压频谱，在2.5kHz和3kHz附近含量

比较高；低压电网节点在2.5kHz附近含量比较高。

— 电源侧，光伏逆变器开关频率16k Hz、18kHz附近有较高谐波存在。

— 消费侧，实际电网波形呈现时变、复杂特性，多重特征叠加：

·特点1，波形畸变严重：LED灯，电流畸变率31%；变频空调，电流畸变率70%；电动汽车直流充电桩电流畸变率39%。

·特点2，波形峰值系数高：空气净化器电流波形峰值系数=4.71；笔记本电脑电流波形峰值系数=3.37。

·特点3，波形频谱分布宽：空气净化器谐波分布大于21次。

4）本文点评

2021年3月，国网发布"碳达峰、碳中和"行动方案，启开电网能源转型，新能源发展的征程。

新能源并网再叠加谐波源用户负荷，极大改变传统电网运行状态，高压/中压/低压电网的情况各不相同，可概括为宽频振荡、过电压、宽频谐波电流3项特征。三相宽频电能表的开发，设计具有高速信息采集、宽动态电流范围、宽频功率计算功能；该新型智能电表的应用，正是适应推进新能源发展与抑制谐波源用户谐波负荷污染的计量需求。

目前，国家尚未出台宽频电能贸易结算电价新政。但在推进新型电力系统建设过程中，新能源并网再叠加谐波源用户负荷引起的计量问题频发，需要在高压电网，中压、低压配变台区（约400万个台区），谐波源用户（三相高压谐波源用户约300万户，三相低压户约700万户）进行在线计量监测，积累电网运行状态计量监测数据并发出监测超标报警。

3、三相宽频电能表基本技术性能的需求

2002年，威胜在国内首先研发出0.2S级、电子式DTSD341 - 9/A/B/C型具有基波、谐波有功计量分析功能的三相多功能表系列产品，为三相宽频电能表基本技术性能的设计提供经验。

本部分内容主要摘自威胜《0.2S级、DTSD341-9A/B/C型三相多功能电能表》系列产品资料，并经编辑而成。

1）该款表的设计方案：有功功率采用积分算法与傅里叶变换两类算法；具有基波、谐波有功计量功能，谐波有功潮流分析功能。其采样速率高（每周波256点）；有功计量准确度，随有功电能计量方式变化而定。

2）9A/B/C型表系列，采用3种电能计量方式，满足不同用户的计量需求。

— 9A型表：

·采用数字乘法器的全波有功计量方式：

P=（P1+Ph）的累加值　　…A式

式中：Ph，h=2…n次谐波有功功率。

·基本技术性能：有功准确度0.2S级，无功2级；计量功能，具有谐波分析功能，提供谐波有功电能和谐波有功潮流方向 。适用于电网关口高准确度计量。

— 9B型表：

·基于正弦波的基波有功计量方式：

P= P1　　…B 式

·基本技术性能：有功准确度0.5S级，无功2级；适用于线性负荷计量。

— 9C型表：有两种电能计量方式，可根据用户需求定制。

·第一种有功计量方式：采用数字乘法器进行全波有功计量（A式）。

·第二种有功计量方式：基于傅里叶变换的谐波有功计量方式。

其一 谐波有功电能计算公式：

P= （P1+ | Ph | ）之和　　…C式

式中：| Ph |，h=2…n次谐波有功功率的绝对值。

其二，基本技术性能：有功准确度0.5S级，无功2级；计量功能，具有谐波有功分析功能，提供谐波电能和谐波有功潮流方向 ，电网谐波畸变报警功能。负荷记录，可记录谐波幅值，前10次谐波相应的电压电流幅值、初相位；适用于化工厂、轧钢厂、电气化铁路等谐波源用户的电能计量。

3）本文点评

由威胜早期的DTSD 341-9A/B/C型三相多功能表系列产品技术设计的启示 ，对三相宽频电能表需有更高的基本技术性能设计要求：主要有适应分布式/集中式新能源并网再叠加集中式/分布式谐波源用户负荷引发电网双向时变复杂波形负荷电流计量监测，电能表需具有宽动态电流范围，精确的功率数学表达式（待查询）；高速率采样（大于/等于256点/周波）；傅里叶变换提高变换精度；采用高阶积分算法或 其它高精度算法，基波有功准确度提高到D级（Itr -Imax，0.2%计量误差），谐波有功计量1级或2级；计量功能，具有电网双向负荷电流计量功能，谐波有功分析功能，提供基波、谐波有功电能和谐波有功潮流方向，电网谐波畸变报

警，可记录1-21 次谐波电压电流幅值、初相位；具有电网电能质量监测功能，包括高压电网宽频振荡、过电压监测，还有电网电压不平衡、谐波畸变率和直流注入等电能质量监测功能；提供电网实际波形的高速率采样及通信接口等。

由此可见，三相宽频电能表主要技术性能开发，具有较多的难点。

4、三相宽频电能表：电网双向时变复杂波形负荷电流的建模与功率算法尚待研究解题

1 ）中国电科院：在国内，首先建立起基于实际电网波形的动态电能计量评价体系

本部分内容摘自“文A”，并经编辑而成。

— 电能表的IEC标准/国标提出诸多谐波试验方法，尚不完善。

由IEC62052、62053系列标准及其等效采用的GB/T 17215相关国标、国内标准，明确规定了不同电流和谐波等影响量变动下电能表的误差或变差限值，加上一些方顶波、尖顶波等畸变特征测试波形，不能综合反映实际电网波形，时域、频域特征叠加波动条件下电能表实际运行误差。由此，电能表采用实际电网波形进行实验室测试方法，逐渐成为最近几年电能表测量领域的研究热点。

— MID-2014/32/EU欧洲仪器指令规定，需要在实际工况下对电能表准确度进行测试，意味着测试条件需要包括基波频率偏差、波形失真、谐波干扰、电压不平衡、和零序等现象的组合。

— 中国电科院：动态电能计量关键技术开发成果。

·动态电能计量技术研究路径，主要包括电网实际波形无损采录和分析、量值溯源与传递、宽动态电能表。

·建立基于实际波形的电能计量模拟试验系统。其主要配置：

其一，美国太平洋公司UPC-32E型任意波形发生器和配套的AMX型电压放大器和跨导放大器。

其中，UPC-32E型任意波形发生器具有多达99段波形分段编辑输出功能，可输出动态测试波形。

其二，（日本）横河（YOKOGAWA）公司DL850型超高速存储录波仪，能够对实际波形进行100 MS/s最高16位的高速采样，能够在实验室模拟各类型负荷对电能表误差及电量采集功能的影响。

·推出电力谐波计量标准装置并提出基于多重平均自适应谐波分析算法，100次谐波分析最佳不确定度优于0.01%。

·时变、非平稳波形分析与模型建立：

其一，波形采集：大型用电场景（地铁、医院等），电能质量监测取得波形数据；小型用电设备（智能冰箱、节能灯具），实验室采集波形数据。

其二，一维特征分析：典型统计量和滤波特性，最佳、均值、中位值、方差、偏度、峰值、各次谐波含量等。

其三，时频联合域分析（JTFA）：采用基于Cohen模型的分布，获取时间频率联合信息，选择最优分布，建立波形的时间频率联合函数，作为后续生成动态波形的数据来源。

·研发出模数同源技术平台：能够输出任意波形的模拟信号和数字信号，实现高准确度动态波形复现。

2 ）借鉴新型冲击负荷电能表设计经验

本部分内容摘自2023年2月2日，湖南电力计量中心、威胜集团 、湖南大学《面向冲击负荷的新型电能表关键技术》，并经编辑而成。

— 冲击负荷模型建立

·采用动态激励OOK(On-Off-Key)键控信号（M1=1，M2=2），建立动态负荷电流的冲击负荷模型。其中，M1和M2表示开关控制信号通断状态控制周期内导通、关断期间所包含50Hz正弦波电流信号的整周期数，分别记为“通周期个数”和“断周期个数”。

·冲击功率的数学表达式：（略）。

·采用以上冲击负荷模型，对基于常用电能表输出脉冲进行测试，在功率因数为1时，电能表动态计量误差-12.86%，稳态计量误差-0.05%。

可见，常用基于周期发送脉冲方式不再适用于冲击负荷计量。

— 冲击负荷计量，主要保证负荷快速大幅度变动情况下全波电能计量的精度。该冲击负荷电能表设计采用新技术有：

·采用24位高精度A/D（采样速率160点/周波）。由此，能够在不切增益情况下，保证宽电流输入范围内的有效运算位数；而18位及以下A/D难以满足0.2S级计量准确度要求。

·采用专用角差补偿滤波器来补偿电流相位。可以快速准确地计算出瞬时功率，并通过瞬时功率直接累加电能和发送脉冲。

·硬件设计：由DSP电路进行快速计算；CPU电路实现整个系统的运算、显示等；电压采样，采用

电阻分压，电阻精度1%，温度系数10 ppm。

·电流采样，采用零磁通电流互感器。对冲击负荷进行全波采集，要求电流信号输入通道具有10kHz带宽；而冲击负荷瞬时电流波形幅值非常大，输入通道还需具备10mA～25A的宽动态范围，保证良好的角差与比差。

— 冲击负荷电能的计算方法

·冲击负荷电能采用瞬时功率脉冲直接累加的方法。当瞬时功率累加值大于一个脉冲电量阀值时，则发出一个脉冲。电能表将该脉冲计入总电量累加池。单个脉冲时段的稳态电量=（实际三相功率之和）·（单个脉冲时段）。

总瞬时功率为一个频率为2ω的正弦波曲线。在动态负荷下，平均功率算法存在滞后性，瞬时功率直接累加则效果更好。该冲击负荷表采用IIR无限冲击响应的低通滤波器，滤掉2ω分量，达到稳定的脉冲电量的要求。

3 ）本文点评

— 中国电科院在国内首先建立起基于实际电网波形的动态电能计量评价体系。其主要开发经验：

·由进口高端测量仪器，构建面向实际波形的电能计量模拟试验系统：可进行高速采样及录波；通过99段频率的分段频率编辑，输出动态测试波形。

·其自主开发项目有：

其一，谐波分析及谐波精确测量装置。

其二，负荷电流波形建模的实用方法。

其三，高准确度复现动态负荷电流波形装置。

·鉴于新能源发展分布全国各地，三相宽频电能表开发应用需要采集实际电网波形及宽频负荷电流建模工作量很大，可以考虑在省级电网计量中心、大型电表企业建设基于实际电网波形的动态电能计量测试系统。由此，建议：国网要规划、部署省级电网建设基于实际电网波形的动态电能计量测试系统项目；电表行业主管部门要牵头组织进口高端测量仪器国产化或自主研发工作。

— 由湖南电力计量中心牵头合作开发的新型冲击负荷电能表，给三相宽频电能表开发提供的经验有：

·冲击负荷的电流电压采样回路，采用24位高精度A/D。

·负荷电流采样，首次采用零磁通电流互感器，实现宽动态电流范围。

·冲击负荷电能采用瞬时功率脉冲直接累加的方法。

·采用动态激励“OOK”键控信号的动态负荷电流建模方法，是一种非实际电网波形的实验室动态负荷电流波形建模方法，可以借鉴应用。

5、对三相宽频电能表通用技术规范编制的讨论

鉴于国网《智能电表（2020版）标准适用于正弦波电能表，三相宽频电能表通用技术规范的编制，可以国网《智能电表（2020版）通用技术规范》为基础，参考IEEE1459-2010标准的功率模型计算方法，按照三相宽频电能动态负荷计量特征，补充提升对三相宽频电能表通用技术规范的主要条款性能要求。其主要条款性能要求有：

1）范围，修改：三相宽频电能表适用于50Hz和h=2~n次谐波（包括其中的各个间谐波）电网中测量，并记录基波有功电能、规定h=2~n次谐波（包括其中的各个间谐波）的正向有功电能之和与反向有功电能之和、基波视在电能、全波（UI）视在电能。

2）术语和定义，补充：

— 基波视在电能、全波（UI）视在电能。

— 基波功率因数、全波功率因数。

— 其它需要补充的术语和定义。

3）补充宽动态电流范围：从起动电流Ist-最小电流Imin-转折电流Itr-最大电流Imax，其中，与正弦波电能静止式表标准相比，Ist宜降低50%，Imax宜扩大1倍。

4）准确度要求，补充：

— 高速率采样，256点/周波。

— 提高傅里叶变换精度要求：（待查询）。

— 采用高精度基波有功功率 、基波视在功率、谐波（包括间谐波）有功功率、全波（UI）视在功率的算法。

— 提出h=2～n次谐波（包括其中的间谐波）有功功率合成算法及计量误差测试方法。

— 经受实际电网波形三相负荷电流电能计量的测试考核。

5）电能质量监测，补充：高压电网宽频振荡、过电压监测功能。

6）电气要求，补充：包括功耗、短时过电流影响、自热影响、交流电压试验、电磁兼容性试验，以及测试方法。

7）输出接口，补充：实际电网波形的高速率采样及通信接口。

8）說明：2013年发布的GB/T 17215.302- 2013

《静止式谐波有功电能表》国标，只适用于正弦波电能静止式表进行有限的谐波电压电流影响的测试。

6、总结语

本文提出推进经受实际电网波形测试考核的三相宽频智能电表开发应用项目，是适应新能源发展并结合抑制谐波源用户负荷污染电网对计量监测新需求的初探。

首先，为何説三相宽频电能表项目是初探？

一是，新能源大规模发展的起步才两年，以后新能源发展到新型电力系统建成，可能引发新的计量监测难点。

二是，中国电科院在国内首先建立基于实际电网波形的动态电能计量评价体系，将引导国产三相宽频电能表开发应用。由此，省级电网将开展基于实际电网波形的动态电能计量测试系统建设。其中，进口高端测试仪器国产化或自主研发，需要较长周期。

三是，此三相宽频电能表开发应用项目还有一个目标，争取国家出台宽频电能电价新政，但很有难度。

四是，三相宽频电能表项目，国网、南网是否能接受、立项并组织实施，也难以估计。

但是，三相宽频电能表项目的提出，将给电表行业发展新的期望。

再是，三相宽频电能表的应用前景。

前面已经説明，近几年，三相宽频电能表的市场，主要是配变台区、谐波源高压用户和大容量低压三相用户，合计约1400万户，可带动电表投资约120亿元；如下一步，国家出台宽频电能电价新政，三相宽频电能表可以再扩展大容量低压三相用户约3500万户，这是对三相宽频电能表应用的预期。

参考文献

[1] 熊德智;周纲;温和;郑小平 面向冲击负荷的新型电能表关键技术研究 《电测与仪表》- 2021-01-20 15:30

[2] 陆以彪;陈碧希;李鹏;康德功 关口电能表动态误差实验室测试方法 《电测与仪表》- 2017-07-10